

MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT, MAGNETO-RESISTANCE EFFECT SENSOR USING THIS, MAGNETORESISTANCE DETECTION SYSTEM, AND MAGNETIC STORAGE SYSTEM

Patent Number: JP10303477

Publication date: 1998-11-13

Inventor(s): HAYASHI KAZUHIKO

Applicant(s): NEC CORP

Requested Patent: JP10303477

Application Number: JP19970112220 19970430

Priority Number(s):

IPC Classification: H01L43/08 ; G11B5/39 ; G11C11/15 ; H01F10/08

EC Classification:

Equivalents: JP2933056B2

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To get good properties in an output value, output waveform, and a bit error rate, and also improve the thermal reliability, in a magnetoresistance effect element, a magnetoresistance effect sensor, a magnetoresistance detection system, and a magnetic storage system.

SOLUTION: This magnetoresistance effect element is one where a base layer 101, the first free magnetic layer 102, a nonmagnetic layer 104, a fixed magnetic layer 106, and an antiferromagnetic layer 107 are made in order on a substrate 100. Then, the base layer 101 is constituted of two or more metallic layers different in material quality stacked. This metallic layer consists of one metal or alloy of two or more metals being selected from the group of Ta, Hf, Zr, W, Cr, Ti, Mo, Pt, Ni, Ir, Cu, Ag, Co, Zn, Ru, Rh, Re, Au, Os, Pd, Nb, and V.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

Best Available Copy

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-303477

(43)公開日 平成10年(1998)11月13日

(51)Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 1 L 43/08

H 0 1 L 43/08

Z

G 1 1 B 5/39

G 1 1 B 5/39

G 1 1 C 11/15

G 1 1 C 11/15

H 0 1 F 10/08

H 0 1 F 10/08

審査請求 有 請求項の数7 OL (全 19 頁)

(21)出願番号

特願平9-112220

(22)出願日

平成9年(1997)4月30日

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 林 一彦

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

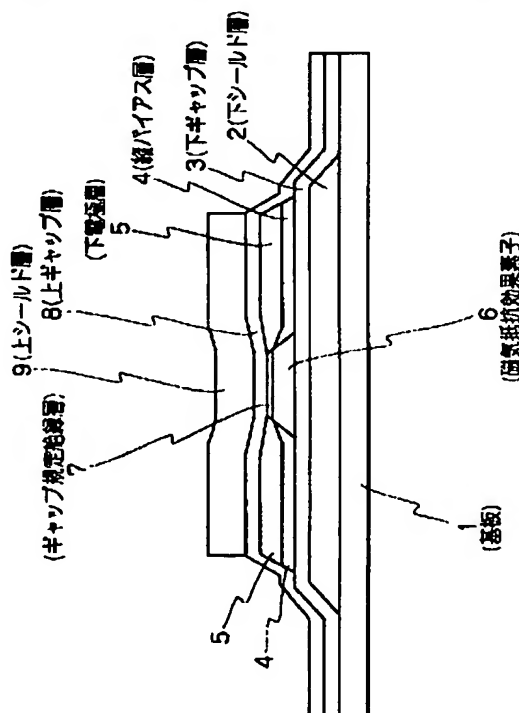
(74)代理人 弁理士 高橋 勇

(54)【発明の名称】 磁気抵抗効果素子並びにこれを用いた磁気抵抗効果センサ、磁気抵抗検出システム及び磁気記憶システム

(57)【要約】

【課題】 磁気抵抗効果素子、磁気抵抗効果センサ、磁気抵抗検出システム及び磁気記憶システムにおいて、出力値、出力波形及びビットエラーレートの良い特性を得るとともに、熱的な信頼性も向上させる。

【解決手段】 本発明の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、第1フリー磁性層102、非磁性層104、固定磁性層106及び反強磁性層107が順次形成されたものである。そして、下地層101は、材質の異なる二以上の金属層が積層されてなる。この金属層は、Ta, Hf, Zr, W, Cr, Ti, Mo, Pt, Ni, Ir, Cu, Ag, Co, Zn, Ru, Rh, Re, Au, Os, Pd, Nb及びVの群から選ばれた一の金属又は二以上の合金からなる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基体上に下地層を介して、磁性層、非磁性層、磁性層及び反強磁性層、又は反強磁性層、磁性層、非磁性層及び磁性層が順次形成された磁気抵抗効果素子において、

前記下地層は、材質の異なる二以上の金属層が積層されてなることを特徴とする磁気抵抗効果素子。

【請求項2】 前記金属層は、Ta, Hf, Zr, W, Cr, Ti, Mo, Pt, Ni, Ir, Cu, Ag, Co, Zn, Ru, Rh, Re, Au, Os, Pd, Nb及びVの群から選ばれた一の金属又は二以上の合金からなる、

請求項1記載の磁気抵抗効果素子。

【請求項3】 前記金属層は、Ta, Hf, Zr, W, Cr, Ti, Mo, Pt, Ni, Ir, Cu, Ag, Co, Zn, Ru, Rh, Re, Au, Os, Pd, Nb又はVからなる、

請求項1記載の磁気抵抗効果素子。

【請求項4】 基板上に下シールド層、下ギャップ層及び磁気抵抗効果素子が順次積層されており、前記下シールド層はパターン化されており、前記磁気抵抗効果素子はパターン化されておりその端部に接するように縦バイアス層及び下電極層が順次積層されており、この下電極層及び前記磁気抵抗効果素子の上に上ギャップ層及び上シールド層が順次積層されているシールド型の磁気抵抗効果センサにおいて前記磁気抵抗効果素子が請求項1、2又は3記載の磁気抵抗効果素子であることを特徴とする磁気抵抗効果センサ。

【請求項5】 基板上に下シールド層、下ギャップ層及び磁気抵抗効果素子が順次積層されており、前記下シールド層はパターン化されており、前記磁気抵抗効果素子はパターン化されておりその上部に一部重なるように縦バイアス層及び下電極層が順次積層されており、この下電極層及び前記磁気抵抗効果素子の上に上ギャップ層及び上シールド層が順次積層されているシールド型の磁気抵抗効果センサにおいて前記磁気抵抗効果素子が請求項1、2又は3記載の磁気抵抗効果素子であることを特徴とする磁気抵抗効果センサ。

【請求項6】 請求項4又は5記載の磁気抵抗効果センサと、この磁気抵抗効果センサを通る電流を生じる手段と、前記磁気抵抗効果センサによって検出される磁界の関数としての抵抗率変化を検出する手段とを備えた磁気抵抗検出システム。

【請求項7】 データ記録のための複数のトラックを有する磁気記憶媒体と、この磁気記憶媒体上にデータを記憶させるための磁気記録システムと、請求項6記載の磁気抵抗検出システムと、この磁気抵抗検出システム及び前記磁気記録システムを前記磁気記憶媒体上の選択されたトラックへ移動させるために当該磁気抵抗検出システム及び磁気記録システムに結合されたアクチュエータ

手段とを備えた磁気記憶システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、磁気記憶媒体に記録した情報信号を読み取るための磁気抵抗効果素子、並びにこれを用いた磁気抵抗効果センサ、磁気抵抗検出システム及び磁気記憶システムに関する。

【0002】

【従来の技術】従来技術として、磁気抵抗(MR)センサ又はMRヘッドと呼ばれる磁気読み取り変換器が知られている。これは、大きな線形密度で磁気記憶媒体表面からデータを読み取れることを特長としている。MRセンサは、読み取り素子によって感知される磁束の強さと方向の関数としての抵抗変化を介して磁界信号を検出する。こうした従来技術のMRセンサは、読み取り素子の抵抗の1成分が磁化方向と素子中を流れる感知電流の方向の間の角度の余弦の2乗に比例して変化する、異方性磁気抵抗(AMR)効果に基づいて動作する。AMR効果のより詳しい説明は、D. A. トムソン(Thompson)等の論文“Memory, Storage, and Related Applications” I EEE Trans. on Mag. MAG-11, p. 1039(1975)に掲載されている。AMR効果を用いた磁気ヘッドではバルクハウゼンノイズを押えるために縦バイアスを印加することが多いが、この縦バイアス印加材料としてFeMn、NiMn、ニッケル酸化物などの反強磁性材料を用いる場合がある。

【0003】さらに最近には、積層磁気センサの抵抗変化が、非磁性層を介する磁性層間での電導電子のスピン依存性伝送、及びそれに付随する層界面でのスピン依存性散乱に帰される、より顕著な磁気抵抗効果が報告されている。この磁気抵抗効果は、「巨大磁気抵抗効果」や「スピン・バルブ効果」など様々な名称で呼ばれている。このような磁気抵抗センサは、適当な材料でできており、AMR効果を利用するセンサで観察されるよりも、感度が改善され、抵抗変化が大きい。この種のMRセンサでは、非磁性層で分離された1対の強磁性体層の間の平面内抵抗が、2つの層の磁化方向間の角度の余弦に比例して変化する。

【0004】特開平2-61572号公報には、磁性層内の磁化の反平行整列によって生じる高いMR変化をもたらす積層磁性構造が記載されている。積層構造で使用可能な材料として、上記公報には強磁性の遷移金属及び合金が挙げられている。また、中間層により分離している少なくとも2層の強磁性層の一方に反強磁性層を付加した構造、及び反強磁性層としてFeMnが適当であることが開示されている。

【0005】特開平4-358310号公報には、非磁性金属体の薄膜層によって仕切られた強磁性体の2層の薄膜層を有し、印加磁界が零である場合に2つの強磁性

薄膜層の磁化方向が直交し、2つの非結合強磁性体層間の抵抗が2つの層の磁化方向間の角度の余弦に比例して変化し、センサ中を通る電流の方向とは独立な、MRセンサが開示されている。

【0006】特開平6-203340号公報には、非磁性金属材料の薄膜層で分離された2つの強磁性体の薄膜層を含み、外部印加磁界がゼロのとき、隣接する反強磁性体層の磁化が他方の強磁性体層に対して垂直に保たれる、上記の効果に基づくMRセンサが開示されている。

【0007】特開平7-262529号公報には、第1磁性層/非磁性層/第2磁性層/反強磁性層の構成を有するスピバルブであって、特に第1及び第2磁性層にCoZrNb、CoZrMo、FeSiAl、FeSi、NiFe又はこれにCr、Mn、Pt、Ni、Cu、Ag、Al、Ti、Fe、Co、Znを添加した材料を用いた磁気抵抗効果素子が開示されている。

【0008】基板上に非磁性層を介して積層した複数の磁性薄膜からなり、非磁性層を介して隣り合う一方の軟磁性薄膜に反強磁性薄膜が隣接して設けてあり、この反強磁性薄膜のバイアス磁界を H_r 、他方の軟磁性薄膜の保磁力を H_{c2} としたときに、 $H_{c2} < H_r$ である磁気抵抗効果膜において、前記反強磁性体がNiO、CoO、FeO、 Fe_2O_3 、MnO、Crの少なくとも1種又はこれらの混合物からなることを特徴とする磁気抵抗効果膜が特開平7-202292号公報に開示されている。また、前述の磁気抵抗効果膜において、前記反強磁性体がNiO、 $Ni_xCo_{1-x}O$ 、CoOから選ばれる少なくとも2種からなる超格子であることを特徴とする磁気抵抗効果膜が、特願平6-214837号公報及び特願平6-269524号公報に開示されている。また、前述の磁気抵抗効果膜において、前記反強磁性体がNiO、 $Ni_xCo_{1-x}O$ ($x=0.1\sim0.9$)、CoOから選ばれる少なくとも2種からなる超格子であり、この超格子中のNiのCoに対する原子数比が1.0以上であることを特徴とする磁気抵抗効果膜が、特願平7-11354号公報に開示されている。また、前述の磁気抵抗効果膜において、前記反強磁性体がNiO上にCoOを10から40オングストローム積層した2層膜であることを特徴とする磁気抵抗効果膜が、特願平7-136670号公報に開示されている。

【0009】また、磁気抵抗効果素子の下地層として、 Si_3N_4 (50nm)/Hf (5nm)/Ta (5nm)を用いた場合については、上述の特開平7-262529号公報の実施例に記述がある。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】従来技術における下地層/フリー磁性層/非磁性層/固定磁性層/反強磁性層という基本構成をもつ磁気抵抗効果素子は、200℃以上でのアニールにより抵抗変化率が大きく低下する。このタイプの磁気抵抗効果素子では、反強磁性層から固定

磁性層へ印加される交換結合磁界を得るために、200℃以上の温度での熱処理の必要なものが多い。ところが、この工程で非磁性層とフリー磁性層及び固定磁性層との間の界面が劣化するために、磁気抵抗変化率が低下するのである。

【0011】また、熱処理を必要としないタイプの反強磁性層を用いた場合においても、記録再生ヘッドを実際に作製する段階では書き込みヘッド部のレジスト硬化工程が不可欠である。そのため、この工程に200℃以上の温度での熱処理が必要になるので、実ヘッドに加工した段階での磁気抵抗効果膜の抵抗変化率が大幅に低下しており、その結果、設計通りの出力値が得られないという問題があった。

【0012】本発明の目的は、十分大きな抵抗変化率、反強磁性層から固定磁性層へ印加される十分小さな交換結合磁界、及びフリー磁性層の十分小さな保磁力を確保した上で、200℃以上での耐熱性を確保した、磁気抵抗変化素子、並びにこれを用いた磁気抵抗効果センサ、磁気抵抗検出システム及び磁気記憶システムを提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明の磁気抵抗効果素子は、基体上に下地層を介して、磁性層/非磁性層/磁性層/反強磁性層、又は反強磁性層/磁性層/非磁性層/磁性層が順次形成されたものである。そして、前記下地層は、材質の異なる二以上の金属層が積層されてなる。具体例を述べれば、これらの金属層は、Ta、Hf、Zr、W、Cr、Ti、Mo、Pt、Ni、Ir、Cu、Ag、Co、Zn、Ru、Rh、Re、Au、Os、Pd、Nb及びVの群から選ばれた一の金属又は二以上の合金からなる。

【0014】2種の異なる格子定数を持つ金属同士を数nmレベルで積層させると、後から形成された金属膜は格子のミスマッチングにより結晶が形成されにくい状態となる。従って、この金属膜は適当な膜厚においてはアモルファスになる。そして、下地層上にフリー磁性層又は反強磁性層が形成されることになるが、このとき、下地層との界面エネルギー、表面エネルギー、及び膜内部でのエネルギーを最少にする構造及び結晶方位で、フリー磁性層又は反強磁性層に結晶成長又はアモルファス化が生じる。ところが、本発明の場合は、下地層が結晶性を持たないため界面エネルギーをほとんど無視することができ、従ってフリー磁性層又は反強磁性層は本来成長したい結晶状態及び方向に自由に成長することができる。

【0015】ところで、スピバルブを構成する材料は、フリー磁性層としてNiFe、NiFeCo、CoFe、アモルファス材料（例えばCoFeB、CoZr系材料）などが、また反強磁性層としてNiMn、IrMn、PdMn、PtMn、RhMn、FeMn等が有

5

力な候補として考えられている。これらのうちNiFe、NiFeCo、CoFeなどは本来最密面を膜面に垂直方向に向けたfccになるのが、またアモルファス材料は本来アモルファスになるのが、さらにNiMn、IrMn、PdMn、PtMn、RhMnは最密面を膜面垂直方向に向けたfcc構造になるのが、そしてFeMnは最密面を膜面垂直方向に向けたfcc構造になるのが、それぞれエネルギー的な面から最も安定な構造である。同時にこれらの構造は、フリー磁性層ならば保磁力が最少になる構造であるし、反強磁性層から固定磁性層に印加される交換結合磁界、及び磁気抵抗変化率が最大になる方向でもある。そしてこれらの特性は、フリー磁性層及び反強磁性層共にスピナバルブヘッドの実用性において最も有効な特性なのである。さらに、これらの構造は、エネルギー的に最も安定な構造であるがゆえに、高温下においても他層との原子の移動が生じにくい。ため、拡散が起こりにくい。従って熱処理による劣化を防ぐこともできるわけである。

【0016】以上により、スピナバルブ膜として、スピナバルブ素子として、又はそれを適用した記録再生ヘッド、記録再生システム、及びハードディスク装置として、出力値、出力波形、及びビットエラーレートにおいて良好な特性が得られるとともに、熱的な信頼性においても優れた特性を得ることができるのである。

【0017】

【発明の実施の形態】本発明を適用したシールド型の磁気抵抗効果センサとしては、図1及び図2のに示す構造のものを用いることができる。

【0018】図1の磁気抵抗効果センサでは、基板1上に下シールド層2、下ギャップ層3、磁気抵抗効果素子6を積層させる。その上にギャップ規定絶縁層7を積層させることもある。下シールド層2は適当な大きさにフォトリソスト(PR)工程によりパターン化されることが多い。磁気抵抗効果素子6はPR工程により適当な大きさ形状にパターン化されており、その端部に接するように縦バイアス層4及び下電極層5が順次積層されている。その上に上ギャップ層8及び上シールド層9が順次積層されている。

【0019】図2の磁気抵抗効果センサでは、基板11上に下シールド層12、下ギャップ層13、磁気抵抗効果素子16を積層させる。下シールド層12は適当な大きさにPR工程によりパターン化されることが多い。磁気抵抗効果素子16はPR工程により適当な大きさ形状にパターン化されており、その上部に一部重なるように縦バイアス層14及び下電極層15が順次積層されている。その上に上ギャップ層18及び上シールド層19が順次積層されている。

【0020】図1及び図2のタイプの、下シールド層としては、NiFe、CoZr、CoFeB、CoZrMo、CoZrNb、CoZr、CoZrTa、CoH

6

f、CoTa、CoTaHf、CoNbHf、CoZrNb、CoHfPd、CoTaZrNb、CoZrMoNi合金、FeAlSi、窒化鉄系材料等を用いることができ、その膜厚は0.3~10 μ mの範囲で適用可能である。下ギャップ層は、アルミナ、SiO₂、窒化アルミニウム、窒化シリコン、ダイヤモンドライクカーボン等が適用可能であり、0.01~0.20 μ m範囲での使用が望ましい。下電極層としては、Zr、Ta、Moからなる単体又は合金又は混合物が望ましく、膜厚範囲は0.01~0.10 μ mがよい。縦バイアス層としては、CoCrPt、CoCr、CoPt、CoCrTa、FeMn、NiMn、IrMn、PtPdMn、ReMn、PtMn、CrMn、Ni酸化物、鉄酸化物、Ni酸化物とCo酸化物の混合物、Ni酸化物とFe酸化物の混合物、Ni酸化物/Co酸化物二層膜、Ni酸化物/Fe酸化物二層膜等を用いることができる。ギャップ規定絶縁層としては、アルミナ、SiO₂、窒化アルミニウム、窒化シリコン、ダイヤモンドライクカーボン等が適用可能であり、0.005~0.05 μ m範囲での使用が望ましい。上ギャップ層は、アルミナ、SiO₂、窒化アルミニウム、窒化シリコン、ダイヤモンドライクカーボン等が適用可能であり、0.01~0.20 μ m範囲での使用が望ましい。上シールド層には、NiFe、CoZr、又はCoFeB、CoZrMo、CoZrNb、CoZr、CoZrTa、CoHf、CoTa、CoTaHf、CoNbHf、CoZrNb、CoHfPd、CoTaZrNb、CoZrMoNi合金、FeAlSi、窒化鉄系材料等を用いることができ、その膜厚は0.3~10 μ mの範囲で適用可能である。

【0021】これらのシールド型の磁気抵抗効果センサは、インダクティブコイルによる書き込みヘッド部を形成することにより、記録再生一体型ヘッドとして用いることができるようになる。図3は記録再生ヘッドの概念図である。記録再生ヘッドは、本発明の磁気抵抗効果センサを用いた再生ヘッドと、インダクティブ型の記録ヘッドとからなる。ここでは長手磁気記録用の記録ヘッドとの搭載例を示したが、本発明の磁気抵抗効果素子を垂直磁気記録用ヘッドと組み合わせ、垂直記録に用いてもよい。

【0022】記録再生ヘッドは、基体50上に下部シールド膜82、磁気抵抗効果素子45及び電極40、上部シールド膜81からなる再生ヘッドと、下部磁性膜84、コイル41、上部磁性膜84からなる記録ヘッドとを形成してなる。この際、上部シールド膜81と下部磁性膜84とを共通にしてもかまわない。この記録再生ヘッドにより、記録媒体上に信号を書き込み、また、記録媒体から信号を読み取るのである。再生ヘッドの感知部分と、記録ヘッドの磁気ギャップはこのように同一スライダ上に重ねた位置に形成することで、同一トラックに

7

同時に位置決めができる。この記録再生ヘッドをスライダに加工し、磁気記録再生装置に搭載した。

【0023】図4は本発明の磁気抵抗効果素子を用いた磁気記録再生装置の概念図である。ヘッドスライダ90を兼ねる基板50上に磁気抵抗効果素子45及び電極膜40を形成し、これを磁気記録媒体91上に位置決めして再生を行う。磁気記録媒体91は回転し、ヘッドスライダ90は磁気記録媒体91の上を、0.2 μ m以下の高さ、又は接触状態で対向して相対運動する。この機構により、磁気抵抗効果素子45は磁気記録媒体91に記録された磁気的信号を、その漏れ磁界から読み取ることのできる位置に設定されるのである。

【0024】図5乃至図12は本発明に係る磁気抵抗効果素子の膜構成の概念図である。図5の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、第1フリー磁性層102、非磁性層104、MRエンハンス層105、固定磁性層106、反強磁性層107及び保護層108を順次積層した構造である。図6の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、第1フリー磁性層102、第2フリー磁性層103、非磁性層104、MRエンハンス層105、固定磁性層106、反強磁性層107及び保護層108を順次積層した構造である。図7の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、第1フリー磁性層102、非磁性層104、固定磁性層106、反強磁性層107及び保護層108を順次積層した構造である。図8の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、第1フリー磁性層102、第2フリー磁性層103、非磁性層104、固定磁性層106、反強磁性層107及び保護層108を順次積層した構造である。図9の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、反強磁性層107、固定磁性層106、MRエンハンス層105、非磁性層104、第1フリー磁性層102及び保護層108を順次積層した構造である。図10の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、反強磁性層107、固定磁性層106、MRエンハンス層105、非磁性層104、第2フリー磁性層103、第1フリー磁性層102及び保護層108を順次積層した構造である。図11の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、反強磁性層107、固定磁性層106、非磁性層104、第1フリー磁性層102及び保護層108を順次積層した構造である。図12の磁気抵抗効果素子は、基体100上に、下地層101、反強磁性層107、固定磁性層106、非磁性層104、第2フリー磁性層103、第1フリー磁性層102及び保護層108を順次積層した構造である。

【0025】下地層としては、2種以上の金属、具体的には、Ta、Hf、Zr、W、Cr、Ti、Mo、Pt、Ni、Ir、Cu、Ag、Co、Zn、Ru、Rh、Re、Au、Os、Pd、Nb、V等からなる多層

8

膜を用いる。例えば、0.2~6.0nmのTa、0.2~1.5nmのHf、又は0.2~2.5nmのZrを用いる。

【0026】第1フリー磁性層及び第2フリー磁性層としては、NiFe、CoFe、NiFeCo、FeCo、CoFeB、CoZrMo、CoZrNb、CoZr、CoZrTa、CoHf、CoTa、CoTaHf、CoNbHf、CoZrNb、CoHfPd、CoTaZrNb、CoZrMoNi合金又はアモルファス磁性材料を用いることができる。膜厚は1~10nm程度が適当であり、望ましくは、0.1~5nm程度が適当である。非磁性層としてはCu、Cuに1~20at%程度のAgを添加した材料、Cuに1~20at%程度のReを添加した材料、Cu-Au合金を用いることができる。膜厚は2~4nmが望ましい。MRエンハンス層としてはCo、NiFeCo、FeCo等、又はCoFeB、CoZrMo、CoZrNb、CoZr、CoZrTa、CoHf、CoTa、CoTaHf、CoNbHf、CoZrNb、CoHfPd、CoTaZrNb、CoZrMoNi合金又はアモルファス磁性材料を用いる。膜厚は0.5~5nm程度が望ましい。MRエンハンス層を用いない場合は、用いた場合に比べて若干MR比が低下するが、用いない分だけ作製に要する工程数は低減する。固定磁性層としては、Co、Ni、Feをベースにするグループからなる単体、合金、又は積層膜を用いる。膜厚は1~50nm程度が望ましい。反強磁性層としては、FeMn、NiMn、IrMn、PtPdMn、ReMn、PtMn、CrMn、Ni酸化物、Fe酸化物、Ni酸化物とCo酸化物の混合物、Ni酸化物とFe酸化物の混合物、Ni酸化物/Co酸化物2層膜、Ni酸化物/Fe酸化物2層膜などを用いることができる。保護層としてはAl、Si、Ta、Tiからなるグループの酸化物又は窒化物、Cu、Au、Ag、Ta、Hf、Zr、Ir、Si、Pt、Ti、Cr、Al、Cからなるグループ、又はそれらの混合物、又は多層膜を用いることができる。保護層を用いることにより耐食性は向上するが、用いない場合は逆に製造工程数が低減し生産性が向上する。

【0027】

【実施例】はじめに、本発明のスピンバルブと比較するために、図5の構成の磁気抵抗効果素子において、下地層101に5nm膜厚のHf単層膜を用いた場合の諸特性を調べた。この際、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、第1フリー磁性層102に8.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、スバッタにより成膜する際のターゲット組成であり膜組成とは異なる、以下の元素についても同じ)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、反強磁性層107に30nm

mのNi₄₆Mn₅₄(at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。NiMn層から固定磁性層に交換結合力が印加されるようにするために、成膜後に 2×10^{-6} Paの真空中において、270℃、5時間の熱処理を施した。その結果、フリー磁性層の保磁力2.5Oe、反強磁性層から固定磁性層へ印加される交換結合磁界460Oe、磁気抵抗効果比2.8%が得られた。

【0028】次に、図5の構成の磁気抵抗効果素子において、下地層101に二層膜を用い、第1下地層の膜厚を一定として、第2下地層の膜厚を変化させた場合の諸特性を調べた。この際、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、第1フリー磁性層102に8.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、反強磁性層107に30nmのNiMn、保護層108に3.0nmのTaを用いた。NiMn層から固定磁性層に交換結合力が印加されるようにするために、成膜後に 2×10^{-6} Paの真空中において、270℃、5時間の熱処理を施した。第1下地層には3nmのHfを用い、第2下地層に用いたTaの膜厚を変化させた。

【0029】この場合のフリー磁性層の保磁力H_cとTa膜厚との関係を図13に、反強磁性層から固定磁性層に印加される交換結合磁界H_{ex}とTa膜厚との関係を図14に、磁気抵抗効果比(MR比)とTa膜厚との関係を図15に示す。Ta層の膜厚が2.0nmのときにフリー磁性層のH_cは最少になり、H_{ex}及びMR比は最大になった。これは、Ta層の膜厚が2nmのときに、フリー磁性層と接しているTa層の最上近傍の原子状態が、フリー磁性層の結晶成長にとって最も有利な状態になっているためと考える。これよりも膜厚が薄いときはTa層の原子構造に第1下地層のHfの構造を反映するために、またこれよりも厚いときはTa層の結晶成長が優位に生じるために、Ta層の状態が最適でなくなると思われる。

【0030】次に、図5の構成の磁気抵抗効果素子において、下地層101に二層膜を用い、第2下地層の膜厚を一定として、第1下地層の膜厚を変化させた場合の諸特性を調べた。このとき、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、第1フリー磁性層102に8.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、反強磁性層107に30nmのNiMn、保護層108に3.0nmのTaを用いた。NiMn層から固定磁性層に交換結合力が印加されるようにするために、成膜後に 2×10^{-6} Paの真空中において、270℃、5時間の熱処理を施した。第2下地層には2nmのTaを用い、第1下地

層に用いたHfの膜厚を変化させた。

【0031】この場合のフリー磁性層の保磁力H_cとHf膜厚との関係を図16に、反強磁性層から固定磁性層に印加される交換結合磁界H_{ex}とHf膜厚との関係を図17に、磁気抵抗効果比(MR比)とHf膜厚との関係を図18に示す。Hf層の膜厚が2~3nmのときにフリー磁性層のH_cは最少になり、H_{ex}及びMR比は最大になった。これは、Hf層の膜厚が2~3nmのときに、フリー磁性層と接しているTa層の最上近傍の原子状態が、フリー磁性層の結晶成長にとって最も有利な状態になっているためと考える。これよりも膜厚が薄いときはTa層の原子構造に第1下地層のHfの構造が反映されないために、またこれよりも厚いときはHf層の影響が強すぎるために、Ta層の状態が最適でなくなるためと思われる。

【0032】次に、図5の構成の磁気抵抗効果素子において、下地層101に二層膜を用いた場合の諸特性を調べた。この際、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、第1フリー磁性層102に8.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、反強磁性層107に30nmのNiMn、保護層108に3.0nmのTaを用いた。NiMn層から固定磁性層に交換結合力が印加されるようにするために、成膜後に 2×10^{-6} Paの真空中において、270℃、5時間の熱処理を施した。

【0033】第1下地層/第2下地層にTa、Hf、Zr、W、Cr、Ti、Mo、Pt、Ni、Ir、Cu、Ag、Co、Zn、Ru、Rh、Re、Au、Os、Pd、Nb、Vからなるグループの組み合わせを用いた場合の、フリー磁性層の保磁力、反強磁性層から固定磁性層に印加される交換結合磁界(Oe)、磁気抵抗効果比(%)を図19乃至図24に示す。図中各項目の1列目がフリー磁性層の保磁力(Oe)、2列目が交換結合磁界、3列目が磁気抵抗効果比である。

【0034】いずれの場合も下地層にHf単層膜を用いた場合と比較して、磁気抵抗変化率が上昇している。これは、下地層の効果により上に成長した層の結晶構造が改善されたことにより、270℃、5時間の熱処理後においてもCu層とフリー磁性層及び固定磁性層との間の界面拡散が抑えられるためと考えられる。

【0035】次に、図5の構成の磁気抵抗効果素子において、反強磁性層の種類を変えて諸特性を調べた。この際、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、下地層101にHf(3nm)/Ta(2nm)二層膜、第1フリー磁性層102に8.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのN

$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%), 保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。反強磁性層を変えた場合の、Hex及びMR比は図25のようになる。

【0036】次に、図5乃至図12の各構成の磁気抵抗効果素子において諸特性を調べた。この際、基体100は厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、下地層101はHf(3nm)/Ta(2nm)2層膜、第1フリー磁性層102は6.0nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、第2フリー磁性層103は1.0nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、非磁性層104は2.8nmのCu、MRエンハンス層105は1.0nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、固定磁性層106は2.6nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、反強磁性層107は30nmの $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (at%)、保護層108は3.0nmのTaとした。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に、270℃、5時間の熱処理を施した。それぞれの場合の諸特性を図26に示す。

【0037】次に、本発明に適用できる磁気抵抗効果素子の例として種々の磁性層を用いて磁気抵抗効果素子を試作して、抵抗変化率、比抵抗、及び比抵抗変化量を測定した。図5の構成の磁気抵抗効果素子において、第1フリー磁性層102の種類を変えて諸特性を調べた。この際、基体100に厚さ1.1mmのコーニング7059ガラス基板、下地層101にHf(3nm)/Ta(2nm)2層膜、非磁性層104に2.8nmの、 $\text{Ag}_{1}\text{Cu}_{99}$ (at%)、MRエンハンス層105に1nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、固定磁性層106に2.6nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。第1フリー磁性層を変えた場合のHex及びMR比は図27のようになる。

【0038】次に、ガラス基板/Hf(3nm)/Ta(2nm)/ $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ (3nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ (3nm)/Cu(2.5nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (3.0nm)/ $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (30nm)という構成で磁気抵抗効果素子を作成した。成膜はマグネトロンスパッタ装置により、5000eVの印加磁界中で行った。この磁気抵抗効果素子を成膜磁界に平行な方向に磁界を印加し、M-H曲線を描かせたところ、4.8%という抵抗変化率が得られた。この構成の膜では1μm幅にパターン化した素子においても磁界感度が良好であった。これは、 $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ (3nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ (3nm)部の2つの $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ 層がRuを通してアンチフェロ的にカップリングしているためにフリー磁性層の実効的な磁化が非常に小さく、固定磁性層とフリー磁性層との間の静磁結合が小さくなるためと考えられる。この素子の比抵抗は印

加磁場零で29μΩcmであり、比抵抗変化量は1.5μΩcmになった。

【0039】次に、ガラス基板/Hf(3nm)/Ta(2nm)/ $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$ (8nm)/Cu(2.5nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)/ $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (30nm)という構成で磁気抵抗効果素子を作成した。成膜はマグネトロンスパッタ装置により、5000eVの印加磁界中で行った。この磁気抵抗効果素子を成膜磁界に平行な方向に磁界を印加し、M-H曲線を描かせたところ、4.9%という抵抗変化率が得られた。この構成の膜では1μm幅にパターン化した素子においても磁界感度が良好であった。これは、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)部の2つのCoFe層がRuを通してアンチフェロ的にカップリングしているためにフリー磁性層の実効的な磁化が非常に小さく、固定磁性層とフリー磁性層との間の静磁結合が小さくなるためと考えられる。この素子の比抵抗は印加磁場零で28μΩcmであり、比抵抗変化量は1.3μΩcmになった。

【0040】次に、ガラス基板/Hf(3nm)/Ta(2nm)/ $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (30nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (3nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (3nm)/Cu(2.5nm)/ $\text{Co}_{92}\text{Zr}_3\text{Nb}_5$ (3nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{92}\text{Zr}_3\text{Nb}_5$ (3nm)という構成で磁気抵抗効果素子を作成した。成膜はマグネトロンスパッタ装置により、5000eVの印加磁界中で行った。この磁気抵抗効果素子を成膜磁界に平行な方向に磁界を印加し、M-H曲線を描かせたところ、4.5%という抵抗変化率が得られた。この構成の膜では1μm幅にパターン化した素子においても磁界感度が良好であった。これは、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (2nm)の2つのCoFe層及び $\text{Co}_{92}\text{Zr}_3\text{Nb}_5$ (3nm)/Ru(0.4nm)/ $\text{Co}_{92}\text{Zr}_3\text{Nb}_5$ (3nm)部の2つの $\text{Co}_{92}\text{Zr}_3\text{Nb}_5$ 層がRuを通してアンチフェロ的にカップリングしているためにフリー磁性層の実効的な磁化が非常に小さく、固定磁性層とフリー磁性層との間の静磁結合が小さくなるためと考えられる。この素子の比抵抗は印加磁場零で38μΩcmであり、比抵抗変化量は1.7μΩcmになった。

【0041】次に、これらの磁気抵抗効果素子をシールド型の磁気抵抗効果センサに適用した例を示す。はじめに、本発明の磁気抵抗効果素子を図1の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはNiFe、下ギャップ層としてはアルミナを用いた。磁気抵抗効果素子としては図5の構成を用い、下地層101にHf(3nm)/Ta(2nm)2層膜、第1フリー磁性層102に8.0nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層10

5に0.4nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、固定磁性層106に2.6nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、反強磁性層107に30nmの $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により $1 \times 1 \mu\text{m}$ の大きさに加工して用いた。この端部に接するように CoCrPt とMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工及びスライダ加工し、 CoCrTa 系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は $1.5 \mu\text{m}$ 、書き込みギャップは $0.2 \mu\text{m}$ 、読み込みトラック幅は $1.0 \mu\text{m}$ 、読み込みギャップは $0.21 \mu\text{m}$ とした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0042】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が155kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.2mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.4dB、エラーレートは 10^{-6} 以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度 $2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0043】次に、本発明の磁気抵抗効果素子を図1の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはNiFe、下ギャップ層としてはアルミナを用いた。磁気抵抗効果素子としては図5の構成を用い、下地層101にW(3nm)/Ta(2nm)2層膜、第1フリー磁性層102に8.0nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、固定磁性層106に2.6nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、反強磁性層107に30nmの $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により $1 \times 1 \mu\text{m}$ の大きさに加工して用いた。この端部に接するように CoCrPt とMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工およびスライダ加工し、 CoCrTa 系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は $1.5 \mu\text{m}$ 、書き込みギャップは $0.2 \mu\text{m}$ 、読み込みトラック幅は $1.0 \mu\text{m}$ 、読み込みギャップは $0.21 \mu\text{m}$ とした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0044】記録マーク長を変えて再生出力を測定した

ところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が150kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.1mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.0dB、エラーレートは 10^{-6} 以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度 $2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0045】次に、本発明の磁気抵抗効果素子を図1の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはNiFe、下ギャップ層としてはアルミナを用いた。磁気抵抗効果素子としては図5の構成を用い、下地層101にZr(3nm)/Ta(2nm)2層膜、第1フリー層102に8.0nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に0.4nmの $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (at%)、固定磁性層106に2.6nmの $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (at%)、反強磁性層107に30nmの $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{54}$ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により $1 \times 1 \mu\text{m}$ の大きさに加工して用いた。この端部に接するように CoCrPt とMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工およびスライダ加工し、 CoCrTa 系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は $1.5 \mu\text{m}$ 、書き込みギャップは $0.2 \mu\text{m}$ 、読み込みトラック幅は $1.0 \mu\text{m}$ 、読み込みギャップは $0.21 \mu\text{m}$ とした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0046】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が158kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.1mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.3dB、エラーレートは 10^{-6} 以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度 $2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0047】次に、本発明の磁気抵抗効果素子を図2の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはFeTa_N、下ギャップ層としてはアモルファスカーボン、磁気抵抗効果素子としては図6の構成を用い、下地層101にTa(5nm)/Hf(2nm)2層膜、第1フリー磁性層102に6.0nmの Ni_{81}F

10

20

30

40

50

e₁₉ (at%)、第2フリー磁性層103に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉ (at%)、反強磁性層107に30nmのNi₄₆Mn₅₄ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により1×1μmの大きさに加工して用いた。この素子部に一部重なるようにCoCrPtとMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工及びスライダ加工し、CoCrTa系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は1.5μm、書き込みギャップは0.2μm、読み込みトラック幅は1.0μm、読み込みギャップは0.21μmとした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0048】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が160kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.8mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.8dB、エラーレートは10⁻⁶以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度2×10⁷ A/cm²、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0049】次に、本発明の磁気抵抗効果素子を図2の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはFeTa₂N、下ギャップ層としてはアモルファスカーボン、磁気抵抗効果素子としては図6の構成を用い、下地層101にTa (5nm)/W (2nm) 2層膜、第1フリー磁性層102に6.0nmのNi₈₁Fe₁₉ (at%) 第2フリー磁性層103に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉ (at%)、反強磁性層107に30nmのNi₄₆Mn₅₄ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により1×1μmの大きさに加工して用いた。この素子部に一部重なるようにCoCrPtとMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工及びスライダ加工し、CoCrTa系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は1.5μm、書き

込みギャップは0.2μm、読み込みトラック幅は1.0μm、読み込みギャップは0.21μmとした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0050】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が160kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.6mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.4dB、エラーレートは10⁻⁶以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度2×10⁷ A/cm²、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0051】次に、本発明による反強磁性材料を図2の磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはFeTa₂N、下ギャップ層としてはアモルファスカーボン、磁気抵抗効果素子としては図6の構成を用い、下地層101にTa (5nm)/Hf (2nm) 2層膜、第1フリー磁性層102に6.0nmのNi₈₁Fe₁₉ (at%) 第2フリー磁性層103に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀ (at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉ (at%)、反強磁性層107に30nmのNi₄₆Mn₅₄ (at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により1×1μmの大きさに加工して用いた。この素子部に一部重なるようにCoCrPtとMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工及びスライダ加工し、CoCrTa系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は1.5μm、書き込みギャップは0.2μm、読み込みトラック幅は1.0μm、読み込みギャップは0.21μmとした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0052】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が160kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.8mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.8dB、エラーレートは10⁻⁶以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度2×10⁷ A/cm²、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0053】次に、本発明による反強磁性材料を図2の

磁気抵抗効果センサに用いた。このとき、下シールド層としてはFeTa₂N、下ギャップ層としてはアモルファスカーボン、磁気抵抗効果素子としては図6の構成を用い、下地層101にTa(5nm)/Zr(2nm)2層膜、第1フリー磁性層102に6.0nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)第2フリー磁性層103に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、非磁性層104に2.8nmのCu、MRエンハンス層105に1.0nmのCo₉₀Fe₁₀(at%)、固定磁性層106に2.6nmのNi₈₁Fe₁₉(at%)、反強磁性層107に30nmのNi₄₆Mn₅₄(at%)、保護層108に3.0nmのTaを用いた。成膜後に、反強磁性層から固定磁性層への交換結合磁界の付与を目的に熱処理を施した。さらにこれを、PR工程により1×1μmの大きさに加工して用いた。この素子部に一部重なるようにCoCrPtとMo下電極層を積層した。上ギャップ層としてはアルミナ、上シールド層としてはNiFeを用いた。このヘッドを図3のような記録再生一体型ヘッドに加工及びスライダ加工し、CoCrTa系媒体上にデータを記録再生した。この際、書き込みトラック幅は1.5μm、書き込みギャップは0.2μm、読み込みトラック幅は1.0μm、読み込みギャップは0.21μmとした。媒体の保磁力は2.5kOeである。

【0054】記録マーク長を変えて再生出力を測定したところ、再生出力が半減するマーク長で周波数が160kFCIとなった。再生出力はpeak to peakで1.7mVであり、ノイズの無い対称性の良好な波形が得られた。S/Nは26.9dB、エラーレートは10⁻⁶以下であった。また、このヘッドを80℃、5000eの中で環境試験を行ったが2500時間までの間でエ

ラーレートは全く変化しなかった。また、このヘッドを電流密度2×10⁷A/cm²、環境温度80℃という条件のもとで通電試験を行ったところ、1000時間まで抵抗値、抵抗変化率共に変化が見られなかった。

【0055】次に本発明を適用して作製された磁気ディスク装置の説明をする。磁気ディスク装置はベース上に3枚の磁気ディスクを備え、ベース裏面にヘッド駆動回路及び信号処理回路と入出力インターフェイスとを収めている。外部とは32ビットのバスラインで接続される。磁気ディスクの両面には6個のヘッドが配置されている。ヘッドを駆動するためのロータリーアクチュエータとその駆動及び制御回路、ディスク回転用スピンドル直結モータが搭載されている。ディスクの直径は46mmであり、データ面は直径10mmから40mmまでを使用する。埋め込みサーボ方式を用い、サーボ面を有しないため高密度化が可能である。本装置は、小型コンピュータの外部記憶装置として直接接続が可能になっている。入出力インターフェイスには、キャッシュメモリを搭載し、転送速度が毎秒5から20メガバイトの範囲であるバスラインに対応する。また、外部コントローラを

置き、本装置を複数台接続することにより、大容量の磁気ディスク装置を構成することも可能である。

【0056】

【発明の効果】本発明によれば、基体と磁性層又は反磁性層との間に、材質の異なる二以上の金属層からなる下地層を介在させたことにより、磁気抵抗効果素子、磁気抵抗効果センサ、磁気抵抗検出システム及び磁気記憶システムとして、出力値、出力波形及びビットエラーレートにおいて良好な特性が得られるとともに、熱的な信頼性においても優れた特性を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る磁気抵抗効果素子を用いた磁気抵抗効果センサの構成を示す概念図である。

【図2】本発明に係る磁気抵抗効果素子を用いた磁気抵抗効果センサの構成を示す概念図である。

【図3】本発明に係る磁気抵抗効果素子を用いた記録再生ヘッドを示す概念図である。

【図4】本発明に係る磁気抵抗効果素子を用いた磁気記録再生装置の概念図である。

【図5】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図6】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図7】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図8】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図9】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図10】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図11】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図12】本発明に係る磁気抵抗効果素子を示す断面図である。

【図13】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Ta層膜厚とフリー磁性層Hcとの関係を示すグラフである。

【図14】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Ta層膜厚とHexとの関係を示すグラフである。

【図15】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Ta層膜厚とMR比との関係を示すグラフである。

【図16】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Hf層膜厚とフリー磁性層のHcとの関係を示すグラフである。

【図17】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Hf層膜厚とHexとの関係を示すグラフである。

【図18】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、Hf層膜厚とMR比との関係を示すグラフである。

【図19】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第

19

1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図20】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図21】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図22】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図23】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図24】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1下地層と第2下地層との組み合わせに対する諸特性を示す図表である。

【図25】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、反強磁性層の材質に対する諸特性を示す図表である。

【図26】図5乃至図12の各構成の磁気抵抗効果素子における諸特性を示す図表である。

【図27】本発明に係る磁気抵抗効果素子における、第1フリー磁性層の材質に対する諸特性を示す図表である。

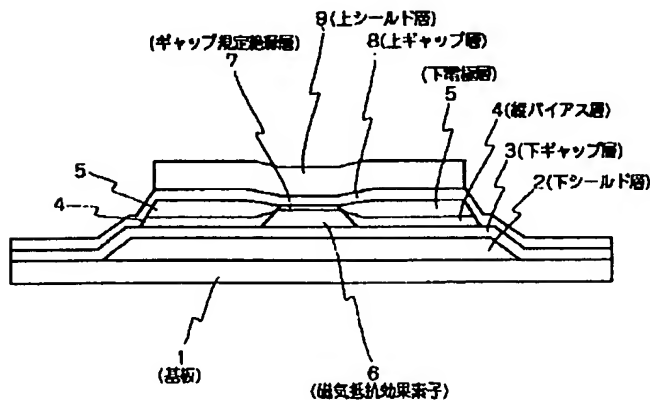
【符号の説明】

- 1, 11 基板
- 2, 12 下シールド層
- 3, 13 下ギャップ層

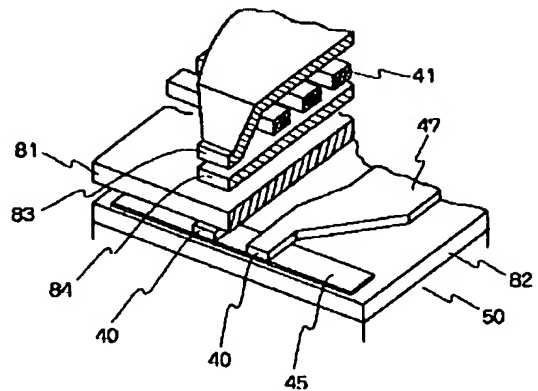
20

- 4, 14 縦バイアス層
- 5, 15 下電極層
- 6, 16 磁気抵抗効果素子
- 7 ギャップ規定絶縁層
- 8, 18 上ギャップ層
- 9, 19 上シールド層
- 40 電極膜
- 41 コイル
- 42 磁気抵抗効果素子幅
- 44 記録トラック幅
- 45 磁気抵抗効果素子
- 50 基板
- 64 媒体からの漏れ磁界
- 81 固定磁性層磁化
- 82 フリー磁性層磁化
- 83 ABS面
- 90 ヘッドスライダー
- 91 磁気記録媒体
- 100 基体
- 101 下地層
- 102 第1フリー磁性層
- 103 第2フリー磁性層
- 104 非磁性層
- 105 MRエンハンス層
- 106 固定磁性層
- 107 反強磁性層
- 108 保護層

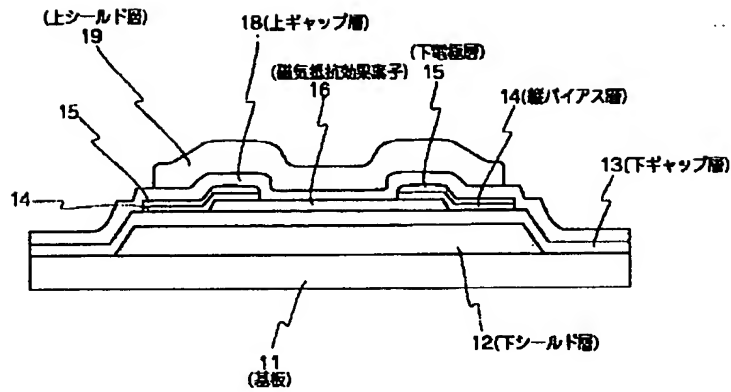
【図1】



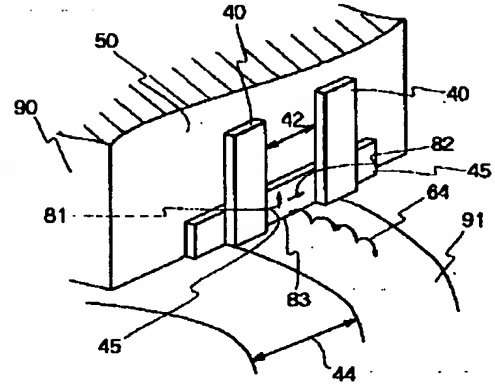
【図3】



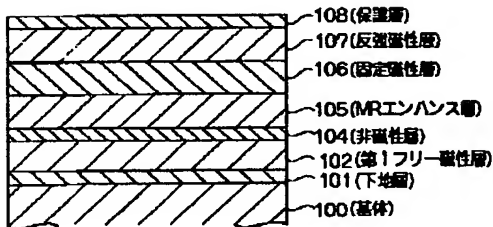
【図2】



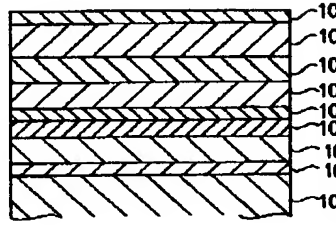
【図4】



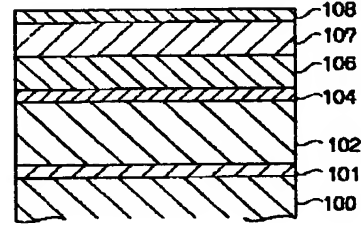
【図5】



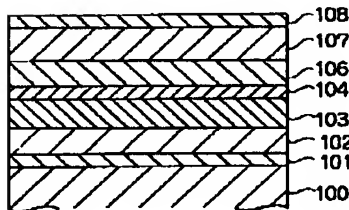
【図6】



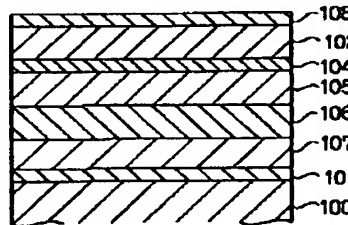
【図7】



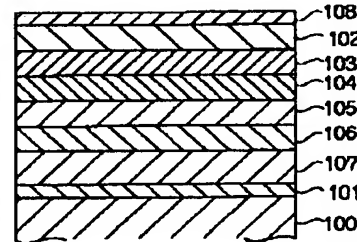
【図8】



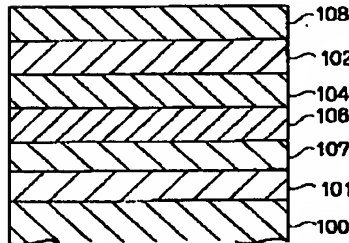
【図9】



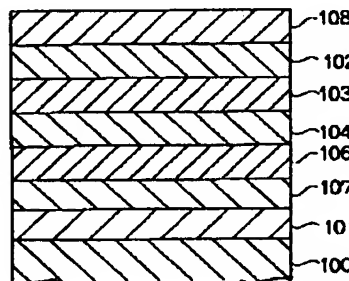
【図10】



【図11】



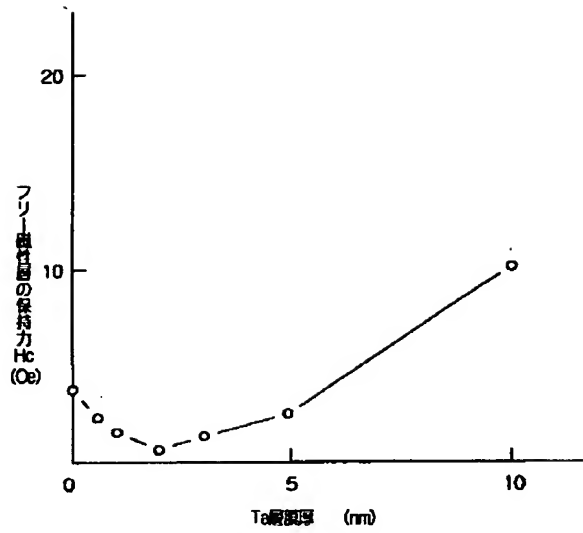
【図12】



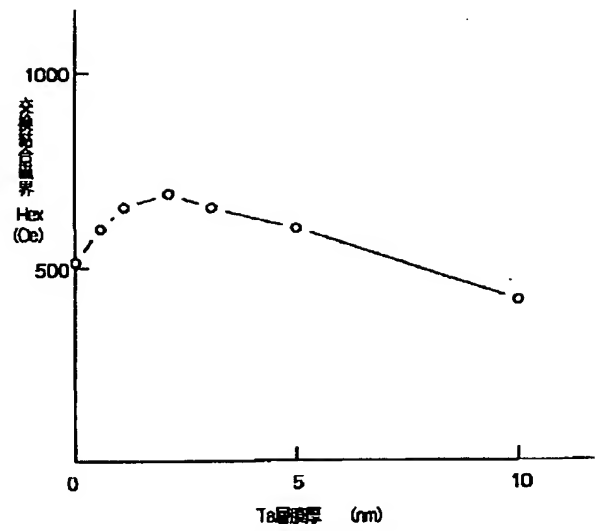
【図26】

膜構成	H _{ex} (Oe)	MR比 (%)
図5の構成	680	6.3
図6の構成	650	8.2
図7の構成	680	3.5
図8の構成	720	5.2
図9の構成	380	6.7
図10の構成	390	8.1
図11の構成	420	4.2
図12の構成	480	6.2

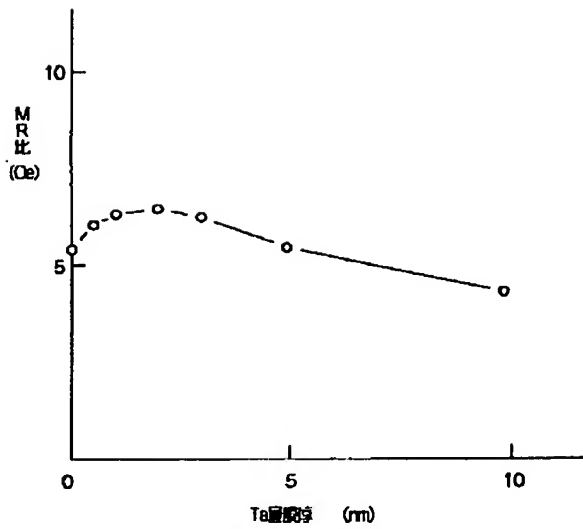
【図13】



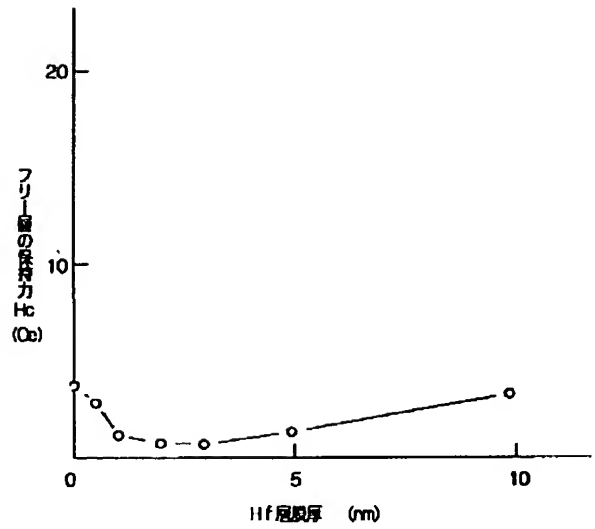
【図14】



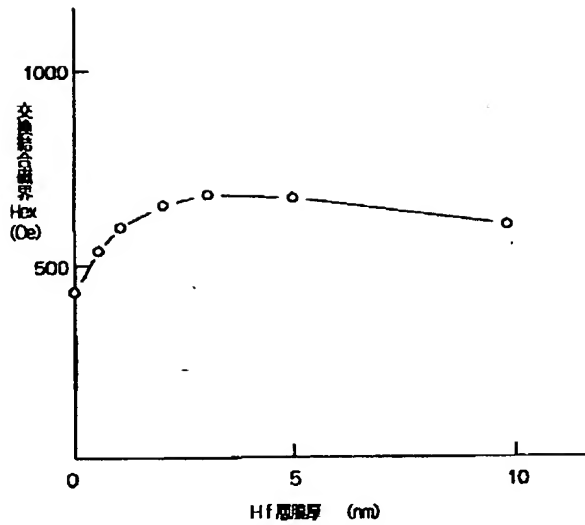
【図15】



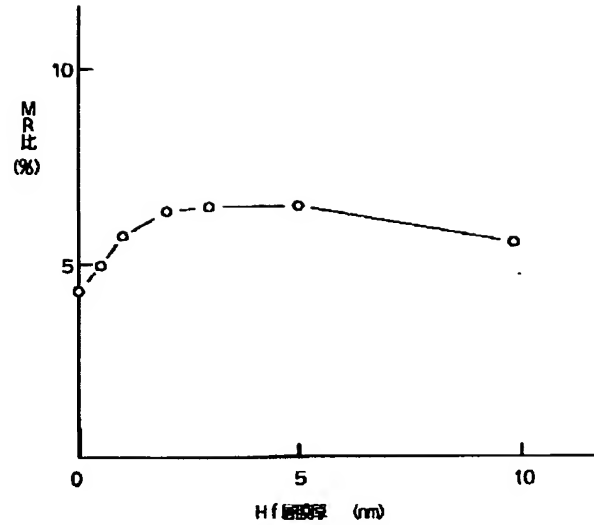
【図16】



【図17】



【図18】



【図19】

		第1下地層									
		(a) Ta	(b) Hf	(c) Zr	(d) W	(e) Cr	(f) Ti	(g) Mo	(h) Pt	(i) Ni	(j) Ir
第2下地層	(1) Ta	-	0.6	0.6	0.7	1.2	0.8	0.4	0.6	0.7	0.9
		-	630	750	640	520	670	620	540	530	560
		-	6.8	7.2	6.5	6.3	6.4	6.9	7.0	4.8	6.5
	(2) Hf	0.6	-	0.7	0.8	0.6	0.5	0.4	0.7	1.0	1.5
		680	-	790	650	520	670	620	540	530	560
		6.3	-	6.4	6.3	6.1	6.8	6.3	6.5	5.8	6.2
	(3) Zr	0.8	0.6	-	0.4	0.4	0.3	0.8	1.0	1.2	0.8
		710	660	-	610	620	640	650	540	590	580
		6.7	6.8	-	6.2	5.9	6.5	5.7	5.2	5.8	5.4
	(4) W	0.3	0.5	0.6	-	0.4	0.7	1.0	0.9	1.0	0.7
		580	490	560	-	520	600	630	570	550	540
		3.7	3.9	4.0	-	4.2	4.4	4.7	4.9	4.4	5.1
	(5) Cr	0.7	0.8	1.2	0.6	-	0.9	0.8	0.6	0.4	1.2
		470	480	510	470	-	520	510	490	420	480
		3.9	3.5	3.6	4.1	-	4.2	4.3	4.1	4.0	3.3
	(6) Ti	1.0	1.1	0.8	0.7	0.6	-	0.3	1.3	0.9	0.7
		550	570	520	530	590	-	620	570	630	590
		5.5	5.8	5.7	4.6	4.6	-	5.1	4.8	4.5	5.5
	(7) Mo	0.8	0.6	0.4	0.5	0.7	0.9	-	1.3	0.9	0.3
		470	590	630	750	640	520	-	670	540	530
		3.5	4.1	3.9	4.7	4.6	4.1	-	4.4	4.5	4.5
	(8) Pt	1.1	0.7	0.8	0.6	0.5	0.6	0.7	-	0.9	0.6
		680	690	630	750	640	520	670	-	620	530
		3.6	3.7	3.5	3.7	3.6	3.8	3.6	-	4.4	4.3

【図20】

		第1下地層									
		(a) Ta	(b) Hf	(c) Zr	(d) W	(e) Cr	(f) Ti	(g) Mo	(h) Pt	(i) Ni	(j) Ir
第2下地層	(9) Ni	0.8 750 3.6	0.4 840 4.1	0.3 520 3.8	0.3 870 4.5	0.7 620 4.2	0.5 540 4.4	0.8 580 4.8	0.9 770 4.8	— — —	0.7 560 3.9
	(10) Ir	0.9 830 3.8	0.7 750 4.1	0.7 640 4.8	0.8 520 4.8	0.9 670 4.2	1.2 620 4.4	0.9 540 4.9	0.3 530 5.0	0.4 770 4.7	— — —
	(11) Cu	0.6 670 3.8	1.5 620 4.2	0.7 540 4.9	0.5 540 4.3	0.6 770 5.3	0.5 610 4.4	0.4 490 4.7	0.7 610 4.6	1.0 530 5.0	2.1 560 3.7
	(12) Ag	2.1 520 3.7	0.7 670 3.2	0.8 650 3.8	0.6 590 3.6	0.5 530 3.9	0.6 620 3.5	0.7 520 3.8	0.7 570 4.1	0.9 510 4.2	0.6 530 4.3
	(13) Co	0.7 370 3.7	0.6 360 4.1	0.4 410 3.5	0.3 350 3.9	1.2 340 4.2	0.9 270 4.1	0.5 370 3.3	0.7 390 3.7	1.8 430 4.5	1.6 460 4.1
	(14) Zn	0.7 410 3.3	1.1 430 3.9	0.9 450 3.6	0.7 440 4.1	0.8 520 4.0	2.7 470 3.7	1.8 420 3.4	0.9 440 3.5	1.6 430 3.3	1.3 460 3.2
	(15) Ru	1.7 560 4.1	1.3 570 4.2	0.9 520 4.1	0.5 490 4.0	1.7 510 3.8	2.8 470 3.5	2.3 420 3.4	3.0 530 3.3	0.8 560 4.2	1.1 460 3.7

【図25】

反強磁性層 組成 (at%)	反強磁性層 膜厚 (nm)	成膜後の 熱処理条件	Hex (Oe)	MR比 (%)
NiMn	30	270℃ 5時間	680	8.3
PtMn	30	250℃ 5時間	630	7.8
IrMn	50	230℃ 5時間	580	8.7
FeMn	8	なし	470	8.5
PtPdMn	30	230℃ 5時間	480	7.8
ReMn	30	220℃ 5時間	380	8.3
CrMn	30	なし	420	8.6
Ni酸化物	30	なし	450	11.5
鉄酸化物	30	なし	400	10.6
Ni酸化物とCo酸 化物の混合物	30	なし	380	11.8
Ni酸化物とFe酸 化物の混合物	30	なし	410	10.0
Ni酸化物/Co酸 化物2層膜	30/1	なし	450	12.0
Ni酸化物/Fe酸 化物2層膜	30/3	なし	440	10.4

【図27】

第1フリー磁性層	抵抗変化率 (%)	比抵抗 ($\mu\Omega\text{cm}$)	比抵抗変化率 ($\mu\Omega\text{cm}$)
Co ₉₂ Zr ₈	6.5	50	3.2
Co ₈₃ Zr ₁₇	5.0	62	3.1
Co ₈₂ Hf ₁₈	6.2	52	3.2
Co ₈₃ Ta ₁₇	5.3	64	3.4
Co ₈₃ Ta ₁₇	6.4	51	3.3
Co ₉₂ Zr ₃ Nb ₅	6.7	63	4.2
Co ₉₁ Hf ₅ Pd ₃	6.5	63	4.1
Co ₈₈ Ta ₈ Hf ₄	5.8	59	3.4
Co ₈₇ Nb ₉ Hf ₄	5.5	57	3.1
Co ₈₇ Ta ₉ Zr ₄	5.4	59	3.2
Co ₈₅ Nb ₉ Zr ₅	5.8	61	3.5
Co ₉₂ Zr ₄ Ta ₄	6.1	58	3.5
Co ₇₉ Zr ₁₀ Mo ₉ Ni ₂	5.8	66	3.8
Co _{82.5} Zr _{15.5} Ta ₂ Nb ₈	5.5	62	3.4
Co ₇₄ Zr ₆ Mo ₂₀	5.8	70	4.1
Co ₇₂ Fe ₈ B ₂₀	4.9	72	3.5

【図21】

	第1下地層									
	(a) Ta	(b) Hf	(c) Zr	(d) W	(e) Cr	(f) Ti	(g) Mo	(h) Pt	(i) Ni	(j) Ir
第2下地層	(16) Rh	0.8 490 4.5	0.8 470 4.6	0.6 450 4.2	0.4 460 4.7	0.9 420 4.8	0.4 480 4.9	0.3 490 4.2	0.5 460 3.9	1.2 420 3.7
	(17) Re	1.0 150 3.1	1.5 190 2.9	1.6 150 3.2	1.4 170 3.4	1.9 200 3.3	2.1 210 2.9	2.4 120 3.0	2.7 170 3.7	1.2 190 3.5
	(18) Au	0.9 570 3.9	0.4 530 3.5	0.6 470 3.6	0.8 460 3.7	0.7 490 4.1	0.4 520 3.9	0.3 590 3.5	0.5 440 3.4	1.2 560 3.8
	(19) Os	3.4 470 3.9	3.5 450 3.5	5.0 460 2.4	5.8 480 3.6	5.8 490 3.7	6.0 450 3.5	2.8 580 3.7	6.2 580 3.5	4.2 510 3.7
	(20) Pd	0.9 450 4.5	0.5 460 5.0	0.7 480 4.9	0.8 520 4.2	0.4 550 4.3	0.9 540 4.5	0.4 490 3.9	0.5 440 4.6	0.9 500 4.7
	(21) Nb	0.6 520 3.9	0.4 590 3.6	0.5 570 3.7	0.4 610 3.5	1.0 580 3.6	1.2 470 3.5	0.5 570 3.4	0.7 610 3.8	0.8 550 3.6
	(22) V	0.7 590 4.5	0.4 610 4.8	0.8 550 4.7	0.9 570 4.6	1.3 610 4.9	0.9 620 5.0	0.6 590 4.7	0.7 550 4.8	1.0 600 4.1

【図22】

		第1下地層											
		(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)	(q)	(r)	(s)	(t)	(u)	(v)
		Cu	Ag	Co	Zn	Ru	Rh	Re	Au	Os	Pd	Nb	V
第2下地層	(1) Ta	0.4	0.6	0.9	0.8	0.7	0.9	0.4	0.5	0.6	0.8	0.7	0.4
		470	850	550	870	430	590	280	450	520	530	470	560
		7.8	7.5	7.2	7.1	7.9	7.2	7.5	7.6	7.4	7.6	7.2	7.6
	(2) Hf	0.5	0.6	0.8	0.7	0.8	0.9	0.5	0.7	0.5	0.7	0.5	0.3
		470	480	420	490	510	560	370	490	480	510	520	490
		7.1	7.2	7.6	8.1	6.8	6.9	7.2	6.9	7.1	7.0	7.8	7.1
	(3) Zr	0.7	0.8	0.6	0.9	0.7	0.5	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.6
		600	540	510	410	610	520	270	560	480	510	590	400
		7.8	7.6	7.9	7.4	7.2	7.1	7.6	6.8	7.2	7.9	6.6	7.0
	(4) W	0.4	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.5	0.7	0.8	0.8	0.4	0.6
		560	570	520	560	580	510	210	550	610	430	540	500
		6.9	6.8	6.2	6.4	6.8	5.9	6.0	6.5	5.8	6.0	6.7	6.5
	(5) Cr	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.6	0.7
		470	850	550	870	430	590	280	450	520	530	470	560
		4.2	4.5	5.0	5.1	4.6	4.9	4.7	3.8	4.5	4.3	4.1	4.0
	(6) Ti	0.4	0.6	0.7	0.6	0.8	0.4	0.6	0.7	0.6	0.8	0.4	0.6
		510	800	540	510	410	610	520	270	580	480	510	590
		5.0	5.1	5.4	4.8	5.6	5.7	5.2	4.6	4.7	5.3	4.5	5.1
	(7) Mo	1.1	1.2	1.6	1.2	1.3	1.5	2.0	2.4	1.6	0.9	1.5	1.7
		570	610	540	590	470	490	560	550	510	490	530	480
		4.8	4.7	4.7	4.8	5.0	5.1	5.0	4.8	4.8	4.7	4.6	4.5
	(8) Pt	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5	0.9	0.5	0.7	0.8	0.9	0.6	0.5
		600	560	540	570	580	620	590	550	540	560	520	510
		3.8	3.7	3.6	3.4	3.5	3.1	3.5	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9

【図23】

第2下地層

第1下地層

	(k) Cu	(l) Ag	(m) Co	(n) Zn	(o) Ru	(p) Rh	(q) Re	(r) Au	(s) Os	(t) Pd	(u) Nb	(v) V
(9) Ni	0.3 460 2.9	0.5 460 2.8	0.8 430 3.1	0.7 410 3.5	1.2 500 3.6	0.8 470 3.7	0.4 430 3.5	0.6 450 3.8	0.7 490 3.9	0.9 510 3.1	0.4 470 3.2	0.5 450 3.5
(10) Ir	0.5 370 4.5	0.8 380 4.2	0.7 420 4.7	0.8 380 4.6	0.3 450 4.3	0.7 460 4.1	0.5 420 4.1	0.8 330 4.0	0.6 350 3.8	0.4 380 4.6	0.3 450 4.2	0.6 390 4.3
(11) Cu	— — —	0.7 540 4.8	0.8 870 4.9	0.9 620 5.1	0.5 540 5.0	0.4 540 5.8	0.6 770 5.2	0.7 610 6.1	0.6 490 4.8	0.3 610 4.7	0.5 530 5.0	0.6 560 5.1
(12) Ag	0.7 460 3.8	— — —	0.8 580 3.5	0.7 570 3.6	0.6 520 3.4	0.7 490 3.1	0.5 510 3.5	0.7 470 3.8	0.5 420 3.8	0.4 530 3.9	0.6 560 3.2	0.7 460 3.1
(13) Co	0.8 470 3.5	0.7 570 3.6	— — —	0.6 610 3.8	0.6 550 3.2	0.7 570 3.1	0.5 610 3.5	0.6 620 3.7	0.4 590 3.0	0.8 550 3.5	0.6 570 3.7	0.7 600 3.2
(14) Zn	0.7 520 3.2	0.6 570 3.5	0.8 580 3.4	— — —	0.4 520 3.8	0.7 490 3.5	0.6 510 3.0	0.7 470 3.5	0.8 420 3.4	0.4 530 3.7	0.6 560 3.5	0.7 460 3.5
(15) Ru	0.6 470 4.2	0.7 450 4.3	0.5 460 3.9	0.8 480 4.2	— — —	0.7 450 3.9	0.5 580 3.8	0.5 580 4.2	0.4 510 4.1	0.8 550 4.5	0.6 490 4.2	0.7 510 3.9

【図24】

		第1下地層											
		(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)	(q)	(r)	(s)	(t)	(u)	(v)
		Cu	Ag	Co	Zn	Ru	Rh	Re	Au	Os	Pd	Nb	V
第2下地層	(16) Rh	0.8	0.9	1.2	1.1	1.0	—	0.9	0.8	0.7	0.6	0.7	0.5
		500	460	450	460	480	—	550	540	490	440	500	450
		4.2	4.1	4.2	4.5	4.0	—	4.1	4.6	4.2	4.3	4.2	4.0
	(17) Re	2.7	6.5	5.5	4.5	3.7	6.3	—	3.3	3.7	5.0	6.3	5.7
		420	480	570	530	470	460	—	520	590	440	560	510
		2.9	3.0	3.2	3.2	3.1	2.9	—	3.0	3.4	3.5	3.7	3.2
	(18) Au	0.7	0.4	0.6	0.5	0.4	0.8	0.4	—	0.7	0.5	0.7	0.3
		470	480	450	460	480	520	550	—	490	440	500	450
		3.5	3.6	3.2	3.7	3.2	3.5	3.8	—	4.1	3.2	3.5	3.7
第2下地層	(19) Os	1.7	1.2	1.6	2.0	2.4	2.6	2.7	2.1	—	1.9	1.8	1.5
		460	510	410	430	450	440	420	460	—	420	450	460
		4.5	4.2	4.3	4.1	4.0	4.5	4.2	4.5	—	4.1	4.2	4.1
	(20) Pd	0.9	1.2	1.3	1.7	1.2	0.8	0.6	0.8	0.9	—	0.8	0.6
		510	460	430	470	510	560	370	490	480	—	520	490
		3.9	3.8	3.6	4.1	4.2	3.8	4.2	3.2	4.5	—	3.9	3.5
	(21) Nb	0.8	0.7	0.9	1.1	1.0	0.8	0.7	0.8	0.9	1.4	—	1.1
		480	470	590	610	550	570	610	620	590	550	—	600
		6.2	6.5	6.8	6.7	6.4	6.2	6.3	6.5	6.1	5.8	—	6.0
第2下地層	(22) V	0.4	0.6	0.7	0.3	0.8	0.9	0.5	0.7	0.6	0.7	0.6	—
		480	490	450	460	480	520	550	540	490	440	500	—
		5.9	5.8	6.5	6.3	5.8	6.5	5.9	6.7	5.9	5.8	6.2	—

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.